اثر موقعیت آب‌بندی بر ارتفاع بالج در هیدروفرمینگ لوله‌های آلومینیومی*

محمدمهدی کسائی[۱] جواد شهبازی کرمی[۲] بهنام عباس‌زاده[۳] سیدجلال هاشمی[٤] حسن مسلمی نائینی[۵]

چکیده *در این مقاله روش آب‌بندی جدیدی برای فرایند هیدروفرمینگ لوله به‌کار گرفته شده است که هدف از آن حذف نیروی اصطکاک در سطح تماس لوله و قالب است. این روش آب‌بندی در بالج آزاد لوله‌های آلومینیومی از جنس AA6063 به‌صورت تجربی مورد آزمایش قرار گرفت و کرنش‌های حد گلویی‌شدن، توزیع ضخامت و ارتفاع بالج نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد بااستفاده‌از روش آب‌بندی جدید درمقایسه‌با روش آب‌بندی متداول، جریان مواد به ناحیهٔ تغییرشکل تسهیل می‌گردد و درنتیجه ارتفاع بالج لوله‌های آلومینیومی افزایش می‌یابد. فرایند بالج آزاد لوله تحت شرایط فرایندی مختلف در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شد. در این شبیه‌سازی‌ها برای پیش‌بینی گلویی‌شدن، از منحنی حد شکل‌دهی به‌دست آمده از آزمایش‌های تجربی استفاده شد. نتایج نشان داد با افزایش ضریب اصطکاک، تغذیهٔ محوری و طول لوله، ارتفاع بالج لوله‌های آلومینیومی در روش آب‌بندی جدید درمقایسه‌با روش آب‌بندی متداول افزایش می‌یابد.*

واژه‌های کلیدی هیدروفرمینگ لوله; آب‌بندی; اصطکاک; ارتفاع بالج; ضخامت.

Effect of Sealing Position on Bulge Height in Hydroforming of Aluminum Tubes

M.M. Kasaei J. Shahbazi Karami B. Abbaszadeh S.J. Hashemi H. Moslemi Naeini

Abstract *In this paper, a new sealing method has been applied in tube hydroforming process to eliminate the friction force between the tube and the die. The new sealing method was experimentally examined in the free bulge test of AA6063 aluminum tubes and necking limit strains, thickness and bulge height of specimens were measured. The results showed that the new sealing method compared to the conventional sealing method improves the material flow to the deformation zone and, therefore, increases the bulge height of aluminum tubes. Finite element simulations of the free bulge test were performed in ABAQUS software under the different process parameters. In these simulations, forming limit curve obtained from the experimental tests was utilized to predict the necking. The results showed that the increase of the friction coefficient, the axial feed and the initial length of tub increase the bulge height of aluminum tubs in the new sealing method compared to the conventional sealing method.*

Key Words Tube Hydroforming; Sealing; Friction; Bulge height; Thickness.

★تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۱۱/۵ و تاریخ پذیرش آن ۹٦/۵/۲۵ می‌باشد. DOI: 10.22067/fum-mech.v29i1.62078

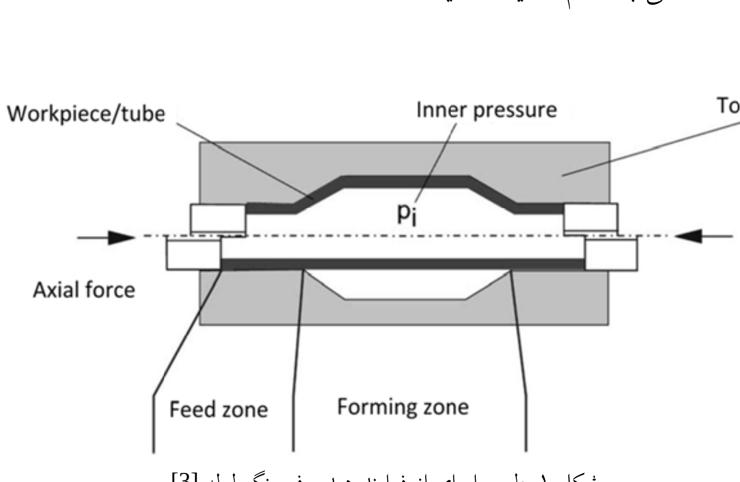
(۱) استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکدهٔ مهندسی صنایع و مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.
kasaei@qiau.ac.ir
(۲) دانشجوی دکتری، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران.
(۳) دانشجوی دکتری، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
(٤) استادیار، بخش مهندسی مکانیک، مؤسسهٔ آموزش عالی کار، قزوین.
(۵) استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

مقدمه

هیدروفرمینگ لوله، یکی از فرایندهای شکل‌دهی فلزات در حال گسترش می‌باشد که برای ساخت قطعات پیچیده از لوله مورد استفاده قرار می‌گیرد [1]. در این فرایند با اعمال فشار سیال، لوله تغییرشکل می‌یابد و شکل قالبی را که در داخل آن قرار گرفته است به خود می‌گیرد (شکل ۱). این فرایند به‌ویژه در صنایع خودروسازی به‌علت مزیت‌های آن نسبت به فرایند استمپینگ ازجمله کاهش وزن، کیفیت بالاتر، عملیات اضافی کمتر، بهبود استحکام ساختاری و افزایش سفتی کاربرد ویژه‌ای پیدا کرده است [2].

در فرایند هیدروفرمینگ ابتدا قطعه‌کار که به‌صورت لوله است در فضای بین قالب‌ها قرار می‌گیرد. سپس سنبه‌ها به‌سمت لوله حرکت و دو انتهای لوله را به‌طور کامل آب‌بند می‌کنند. درادامه روغن وارد فضای داخلی لوله می‌گردد و با پر شدن آن، سطح داخلی لوله تحت فشار قرار می‌گیرد. با ادامهٔ ورود روغن و افزایش بیشتر فشار، لوله دچار تغییرشکل می‌شود و شکل قالب‌ها را به خود می‌گیرد. به‌منظور بهبود شرایط تغییرشکل معمولاً سنبه‌ها به هنگام اعمال فشار به‌سمت لوله حرکت می‌کنند.

در قالب، دو ناحیهٔ اصلی به نام ناحیهٔ تغذیه (Feed zone) و ناحیهٔ تغییرشکل (Forming zone) وجود دارد که در شکل (۱) نشان داده شده‌اند. در ناحیهٔ تغذیه، لوله از ابتدا تا انتهای فرایند در تماس با قالب می‌باشد و تغییر سطح مقطع در آن روی نمی‌دهد. لوله در این ناحیه در اثر نیروی محوری اعمالی توسط سنبه‌ها در حین انجام فرایند به‌سمت ناحیهٔ تغییرشکل حرکت داده می‌شود تا بدین ترتیب جریان مواد به‌سمت ناحیهٔ تغییرشکل تسهیل گردد و مقدار تغییرشکل لوله افزایش یابد. در ناحیهٔ تغییرشکل، برخلاف ناحیهٔ تغذیه، لوله در ابتدا در تماس با قالب نمی‌باشد ولی با اعمال فشار داخلی و آغاز تغییرشکل، لوله بالج می‌شود و به‌تدریج در تماس با قالب قرار می‌گیرد. در فرایند هیدروفرمینگ لوله شرایط ایده‌آل تغییرشکل زمانی به‌دست خواهد آمد که در انتهای فرایند حفرهٔ قالب به‌طور کامل پر شود یا به‌عبارت دیگر لوله تغییرشکل یافته به‌طور کامل در تماس با قالب قرار بگیرد. باتوجه به شرایط تماسی در ناحیهٔ تغذیه و ناحیهٔ تغییرشکل می‌توان نتیجه گرفت که اصطکاک در فرایند هیدروفرمینگ لوله از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به‌نحوی که بسیاری از عیوب ایجادشده در محصولات تولیدشده در این فرایند در ارتباط با آن می‌باشند.



شکل ۱ طرح‌واره‌ای از فرایند هیدروفرمینگ لوله [3]

پژوهش‌های مختلفی درباره اصطکاک در فرایند هیدروفرمینگ لوله انجام شده است که می‌توان آنها را در دو دسته مورد بررسی قرار داد. دسته اول پژوهش‌هایی هستند که هدف از آنها پیش‌بینی ضریب اصطکاک در سطح تماس لوله و قالب است. از جمله پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه طراحی آزمونی برای پیش‌بینی ضریب اصطکاک در ناحیهٔ تغذیهٔ فرایند هیدروفرمینگ لوله است [2, 4, 5]. در این آزمون یک لوله که تحت فشار داخلی قرار دارد در قالب استوانه‌ای حرکت داده می‌شود و بااستفاده‌از نیروسنج، نیروی تماسی و نیروی اصطکاک اندازه‌گیری می‌شود و براساس قانون کولمب (Coulomb's law)، ضریب اصطکاک محاسبه می‌گردد. ولرتسن و پلانک [3] روشی را برای اندازه‌گیری اصطکاک در ناحیهٔ تغییرشکل ارائه دادند که در آن از آزمون آبستینگ لوله استفاده می‌شد. آن‌ها با انجام آزمایش‌های متعدد نشان دادند رابطهٔ خطی بین شیب کرنش ضخامتی و ضریب اصطکاک وقتی به‌صورت لگاریتمی رسم می‌شوند، وجود دارد. پلانک و همکارانش [1] در ادامهٔ پژوهش‌های خود، برمبنای آزمون تجربی طراحی‌شده در مرجع [3]، مدل تحلیلی برای به‌دست آوردن ضریب اصطکاک در ناحیهٔ تغییرشکل ارائه کردند. در این آزمون آنها سه رابطهٔ مختلف را برای محاسبهٔ فشار تماسی به‌کار بردند.

وای و همکارانش [6] با انجام آزمون‌های شبیه‌سازی‌کننده شرایط اصطکاکی در ناحیهٔ تغذیه، نشان دادند با افزایش فشار داخلی، ویسکوزیته روانکار و استحکام لوله و همچنین کاهش قطر لوله ضریب اصطکاک در ناحیهٔ تغذیه کاهش پیدا می‌کند. آنها برای اندازه‌گیری ضریب اصطکاک در ناحیهٔ تغییرشکل آزمون پر شدن گوشه (Corner-filled test) را توسعه دادند. نتایج آنها نشان داد ضریب اصطکاک در ناحیهٔ تغییرشکل با افزایش استحکام ماده افزایش می‌یابد.

فیورنتینو و همکارانش [7] آزمون جدیدی را برای اندازه‌گیری اصطکاک در ناحیهٔ تغذیه ارائه کردند که اساس آن برمبنای اثرگذاری اصطکاک بر توزیع ضخامت دیوارهٔ لوله بود. یان و همکارانش [8] آزمونی را برای تعیین ضریب اصطکاک در فرایند هیدروفرمینگ پالسی ارائه کردند. ابدلکفی و همکارانش [9] از مدل ابرن-هو [10] برای پیش‌بینی ضریب اصطکاک در فرایند هیدروفرمینگ لوله با قالبی با مقطع مربعی استفاده کردند.

در دستهٔ دوم پژوهش‌هایی که در زمینهٔ اصطکاک در فرایند هیدروفرمینگ لوله انجام شده است، اثر ضریب اصطکاک و روانکارهای مختلف بر تغییرشکل لوله در این فرایند مورد بررسی قرار گرفته است. اربن و هو [10] مدل تحلیلی برای تغییرشکل لوله در داخل قالبی با مقطع عرضی مربعی ارائه کردند. نتایج آنها نشان داد افزایش ضریب اصطکاک سبب افزایش تغییرات ضخامت در مقطع عرضی و افزایش نازک‌شدگی گوشه‌ها می‌گردد. ژو و همکارانش [11] به بررسی فرایند هیدروفرمینگ مقطع ذوزنقه‌ای با زاویهٔ ۹۰ درجه پرداختند. نتایج آنها نشان داد با افزایش ضریب اصطکاک، فشار ترکیدگی کاهش پیدا می‌کند.

نیخاره و همکارانش [12] به مقایسهٔ فرایند هیدروفرمینگ لولهٔ فشار بالا و فشار پایین برای فولاد TRIP پرداختند. آنها فرایند هیدروفرمینگ با قالب مربعی را شبیه‌سازی کردند و نشان دادند که درنظر گرفتن اصطکاک در شرایط فشار بالا برروی توزیع تنش معادل در مقطع عرضی و توزیع ضخامت اثر قابل‌توجهی می‌گذارد درحالی‌که در فرایند هیدروفرمینگ فشار پایین این‌چنین نیست. فیورنتینو و همکارانش [13] با ایجاد شرایط نامتقارن در ناحیهٔ تغذیه فرایند هیدروفرمینگ لوله توانستند یک قطعهٔ Yشکل را به‌صورت شبه‌ازاد شکل دهند. آنها برای ایجاد شرایط نامتقارن در فرایند هیدروفرمینگ لوله، طول لوله در ناحیهٔ تغذیهٔ یک طرف قالب را از طرف دیگر متفاوت درنظر گرفتند تا با اثرگذاری بر شرایط

تماسی، بتوانند میزان تغذیه متفاوتی را ایجاد کنند.

ابدلکفی و همکارانش [14] فرایند هیدروفرمینگ لوله را بدون تغذیهٔ محوری و با قالب‌های با سطح مقطع مربعی، مستطیلی، ذوزنقه‌ای متقارن و ذوزنقه‌ای با زاویهٔ 90 درجه انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که استفاده از تفلن در سطح تماس لوله و قالب به‌عنوان روانکار، اثر قابل‌توجهی برروی توزیع ضخامت در قطعه می‌گذارد به‌طوری‌که توزیع ضخامت یکنواختی درمقایسه‌با شرایط بدون روانکار به‌دست می‌آید.

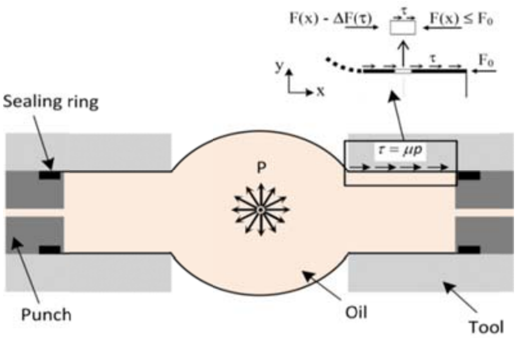
فیورنتینو و همکارانش [15] به بررسی اثر روانکارهای مختلف (خشک، روغن، تفلن، تفلن با روغن، اسپری تفلن و روغن گرافیتی) بر فرایند هیدروفرمینگ لوله پرداختند. نتایج آنها نشان داد بهترین عملکرد از لحاظ ارتفاع بالج و یکنواختی توزیع ضخامت به هنگام رواتکاری با تفلن به‌دست می‌آید که کمترین ضریب اصطکاک را در فرایند ایجاد می‌کند. این در حالی است که بهترین نتایج از لحاظ کیفیت سطح در حالت بدون روانکار به‌دست آمد.

در حال حاضر در صنایع خودروسازی تقاضای بالایی برای کاهش وزن و افزایش مقاومت به خوردگی قطعات وجود دارد. آلیاژهای آلومینیوم با نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت به خوردگی مناسب می‌توانند به‌صورت گسترده برای برآورده کردن این نیازها به‌کار روند. یکی از فرایندهایی که قابلیت ساخت قطعات مورد نیاز این صنایع را دارد، فرایند هیدروفرمینگ لوله است. از آن‌جایی که شکل‌پذیری آلیاژهای آلومینیوم در دمای محیط کم است [16] هر روشی که بتواند به افزایش شکل‌پذیری این آلیاژها کمک کند می‌تواند دامنهٔ کاربرد این آلیاژها را افزایش دهد.

باتوجه به این توضیحات، در این پژوهش روش آب‌بندی جدیدی مورد استفاده قرار گرفته است که هدف از آن حذف نیروی اصطکاک در ناحیهٔ تغذیه لوله می‌باشد. این روش آب‌بندی در آزمون بالج آزاد پیاده‌سازی شد و نتایج آن با نتایج روش آب‌بندی متداول مقایسه گردید. در این پژوهش از شبیه‌سازی اجزای محدود برای بررسی دقیق‌تر چگونگی اثرگذاری روش آب‌بندی بر شکل‌پذیری لوله در فرایند بالج آزاد استفاده شد و مکانیک تغییرشکل مورد تحلیل قرار گرفت. در شبیه‌سازی‌های اجزای محدود برای پیش‌بینی گلویی‌شدن از منحنی حد شکل‌دهی استفاده شد که بااستفاده‌از آزمون‌های تجربی انجام‌شده در این پژوهش به‌دست آمده بود.

اصول روش‌های آب‌بندی متداول و جدید

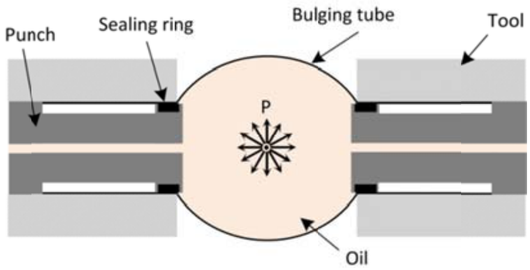
در فرایند هیدروفرمینگ لوله به‌صورت متداول آب‌بندی از دو انتهای لوله انجام می‌شود. این روش آب‌بندی که از این پس در این مقاله «روش آب‌بندی متداول» نامیده می‌شود در شکل (۲) به‌صورت شماتیک برای بالج آزاد لوله، نشان داده شده است.



شکل ۲ طرح‌واره‌ای از آزمون بالج آزاد لوله با روش آب‌بندی متداول

در روش آب‌بندی متداول، ناحیهٔ تغذیهٔ لوله تحت فشار بالای روغن قرار دارد. بنابراین نیروی اصطکاک در سطح تماس لوله و قالب، قابل توجه است. با حرکت از انتهای لوله به‌سمت ناحیهٔ تغییرشکل با افزایش سطح تماس لوله و قالب، نیروی اصطکاک به‌صورت پیوسته افزایش می‌یابد و درنتیجه اثر نیروی اعمال شده توسط سنبه‌ها برای تغذیهٔ محوری لوله، کاهش می‌یابد (شکل ۲). ازآنجایی‌که کاهش تدریجی

اثر نیروی اعمال‌شده توسط سنبه‌ها منجر به کاهش جریان مواد از ناحیهٔ تغذیه به ناحیهٔ تغییرشکل می‌شود در این پژوهش روش آب‌بندی جدیدی به‌کار گرفته شد. در این روش، آب‌بندی از ابتدای ناحیهٔ تغییرشکل اعمال می‌گردد تا فشار داخلی در ناحیهٔ تغذیهٔ لوله اعمال نشود و در پی آن نیروی اصطکاک در سطح تماس لوله و قالب حذف گردد. این روش آب‌بندی که در شکل (۳) به‌صورت طرح‌واره نشان داده شده است از این پس «روش آب‌بندی جدید» نامیده می‌شود. در این روش آب‌بندی، بخشی از سنبه که دارای قطری کوچک‌تر از قطر لوله است به داخل لوله می‌رود و آب‌بندی از ابتدای ناحیهٔ تغییرشکل انجام می‌گیرد. در این روش حداکثر میزان جابه‌جایی سنبه در هر طرف برابر با عرض واشر آب‌بندی می‌باشد زیرا در صورتی که میزان جابه‌جایی بیش از عرض واشر باشد، واشر از ناحیهٔ تغذیه خارج و آب‌بندی از بین می‌رود.



شکل ۳ طرح‌واره‌ای از آزمون بالج آزاد لوله با روش آب‌بندی جدید

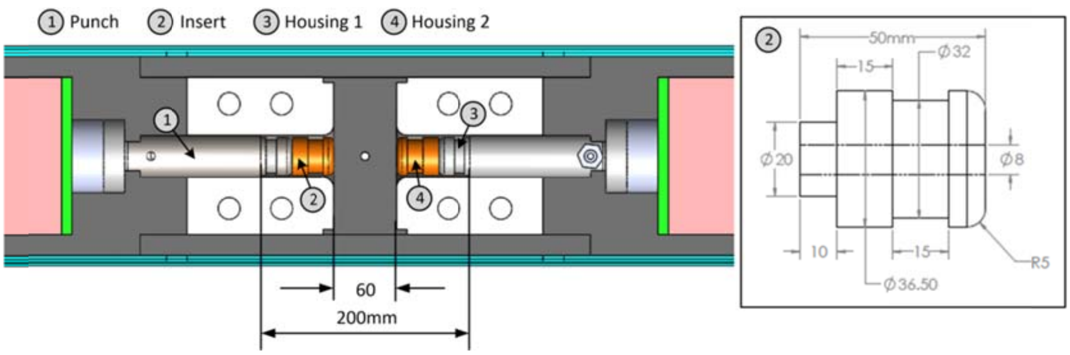
پیاده‌سازی روش آب‌بندی جدید

به‌منظور پیاده‌سازی روش آب‌بندی جدید مطابق شکل (٤)، افزونه‌های ویژه‌ای طراحی شد که این افزونه‌ها به‌صورت پیچی به سنبه‌های روش آب‌بندی متداول متصل می‌شوند.

طول این افزونه‌ها متناسب با طول ناحیهٔ تغذیه می‌باشد. این شیوهٔ طراحی اجازه می‌دهد که بتوان لوله‌هایی با طول ناحیهٔ تغذیهٔ مختلف را تنها با تغییر افزونه‌ها بالج کرد. در این طرح، افزونه‌ی که در سمت چپ قرار گرفته است دارای یک سوراخ سرتاسری می‌باشد تا امکان ورود روغن به داخل لوله فراهم شود. عرض واشر برروی افزونه‌ها، تعیین‌کنندهٔ حداکثر میزان تغذیهٔ محوری در هر سمت لوله است.

آزمایش‌های تجربی

لولهٔ مورداستفاده در آزمایش‌های تجربی از آلیاژهای آلومینیوم با شمارهٔ استاندارد AA6063 می‌باشد که دارای قطر خارجی ٤۰ میلی‌متر و ضخامت اولیهٔ ۱/۵ میلی‌متر است. لوله بدون درز بوده و با فرایند اکستروژن تولید شده است. درادامه به تشریح آزمایش‌های تجربی انجام‌شده در این مقاله پرداخته می‌شود.



شکل ٤ آزمون بالج آزاد لوله همراه با افزونه طراحی‌شده برای روش آب‌بندی جدید

خواص مکانیکی. برای به‌دست آوردن خواص مکانیکی لوله، نمونه‌های آزمون کشش تک‌محوری مطابق استاندارد ASTM-E8M در راستای طولی لوله به‌وسیلهٔ برش‌کاری سیمی بریده شدند. نمونه‌های آماده‌شده برروی دستگاه کشش یونیورسال تحت کشش قرار گرفتند که نتایج آن در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱ خلاصهٔ خواص مکانیکی لوله‌ای آلومینیومی از جنس AA6063 با ضخامت 1.5 mm

مدول الاستیک	استحکام تسلیم	استحکام کششی نهایی	افزایش طول قبل از شکست
E (GPa)	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	A(%)
70	91.76	169.89	16.03

آزمون بالج آزاد لوله. به‌منظور مقایسهٔ عملکرد روش آب‌بندی جدید با روش آب‌بندی متداول از آزمون بالج آزاد لوله استفاده شد. در این آزمون در ناحیهٔ تغییرشکل، تماسی بین لوله و قالب وجود ندارد بنابراین به‌خوبی می‌توان اثرات استفاده از روش آب‌بندی جدید را بر تغییرشکل لوله مورد بررسی قرار داد بدون آنکه شرایط تماسی در ناحیهٔ تغییرشکل بر آن اثرگذار باشد.

به‌منظور انجام بالج آزاد لوله‌های آلومینیومی تحت منحنی‌های بارگذاری مختلف از دستگاه هیدروفرمینگ دانشگاه تربیت مدرس که دارای قابلیت کنترل فشار داخلی و تغذیهٔ محوری است استفاده شد. شکل (۵) نمایی از این دستگاه را نشان می‌دهد. در این شکل قالب‌هایی که در دو طرف برای نگهداری دو انتهای لوله مورد استفاده قرار می‌گیرند، جک‌های اعمال تغذیهٔ محوری و سنبه‌ها و نازل ورود روغن مشخص هستند.

در این دستگاه برای اعمال فشار داخلی و همچنین تأمین فشار لازم برای حرکت جک‌های اعمال تغذیهٔ محوری از دو پمپ هیدرولیکی استفاده می‌شود. فشار داخلی توسط فشارسنج دیجیتال و تغذیهٔ محوری به‌وسیلهٔ یک LVDT اندازه‌گیری می‌شود و باتوجه‌به مسیر بارگذاری موردنظر میزان باز یا بسته شدن شیر تناسبی که در مسیر هر دو پمپ هیدرولیک قرار دارند توسط کامپیوتر کنترل می‌شود.

شکل (٦) سنبه‌های به‌کار رفته در روش آب‌بندی متداول و روش آب‌بندی جدید را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است تفاوت سنبهٔ روش آب‌بندی جدید با روش آب‌بندی قدیم، افزونه‌ی است که به‌صورت پیچی به آن متصل می‌گردد.



شکل ۵ دستگاه بالج آزاد لوله



شکل ٦ سنبهٔ (الف) روش آب‌بندی متداول، (ب) روش آب‌بندی جدید

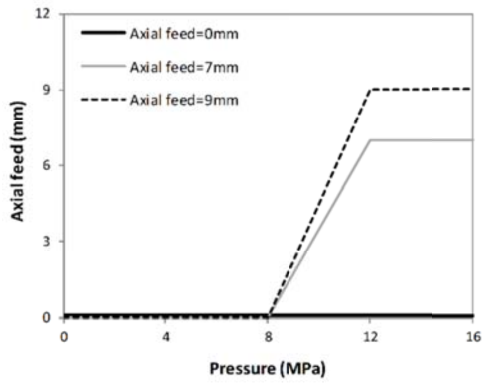
عرض واشر افزونه برابر با ۱۵ میلی‌متر می‌باشد که اجازهٔ جابه‌جایی حداکثر سنبه را در هر طرف به همین میزان می‌دهد. به‌منظور افزایش ایمنی، آب‌بندی در

انتهای لوله نیز انجام می‌گیرد. برای جلوگیری از خروج روغن از فضای بین سنبه و افزونه، واشر نازکی هم در این ناحیه مورداستفاده قرار گرفت که قطر کوچک‌تری نسبت به قطر داخلی لوله دارد.

مشخصات آزمایش‌های تجربی در جدول (۲) آمده است. در این آزمایش‌ها تنها مقدار تغذیهٔ محوری متغیر است. این آزمایش‌ها با هر دو روش آب‌بندی متداول و جدید انجام شده است و مسیر بارگذاری مطابق شکل (۷) است.

جدول ۲ مشخصات آزمایش‌های تجربی

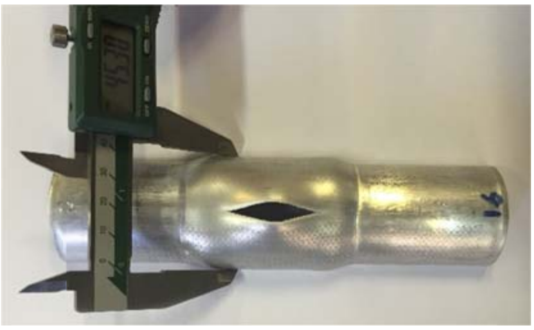
پارامتر		مقدار		
قطر خارجی لوله	D_{out} (mm)	40		
ضخامت لوله	t (mm)	1.5		
طول لوله	L (mm)	200		
طول بالج	L_b(mm)	60		
تغذیهٔ محوری	F (mm)	0	7	9

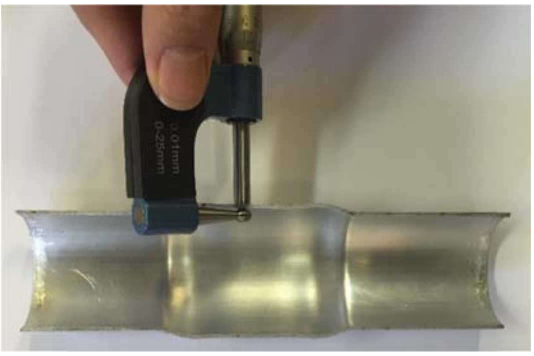


شکل ۷ مسیر بارگذاری به‌کار رفته در آزمایش‌های تجربی

اندازه‌گیری هندسهٔ لولهٔ تغییرشکل‌یافته. برای بررسی هندسهٔ لولهٔ تغییرشکل یافته، قطر و ضخامت آن مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. برای اندازه‌گیری قطر لوله، از کولیس دیجیتال با دقت 0.01 میلی‌متر استفاده شد. اندازه‌گیری برروی مسیری در راستای طولی لوله و برروی صفحه‌ای عمود بر صفحهٔ گذرنده از محل پارگی انجام گرفت که نحوهٔ انجام اندازه‌گیری در شکل (۸) آمده است.

برای اندازه‌گیری ضخامت لوله پس از تغییرشکل، لوله در راستای طولی در صفحه‌ای عمود بر صفحهٔ گذرنده از محل پارگی وایرکات شد. سپس بااستفاده‌از یک میکرومتر مخصوص با دقت 0.01 میلی‌متر ضخامت در لبه‌های بریده‌شده اندازه‌گیری شد. شکل (۹) نحوهٔ اندازه‌گیری ضخامت را برروی مقطع لوله نشان می‌دهد.


شکل ۸ روش اندازه‌گیری ارتفاع بالج


شکل ۹ روش اندازه‌گیری ضخامت

منحنی حد شکل‌دهی. منحنی حد شکل‌دهی مرزی است بین ترکیبات کرنشی که در آنها واماندگی از نوع گلویی‌شدن رخ می‌دهد و ترکیبات کرنشی که در شکل‌دهی ورقی فلزات قابل قبول هستند. برای به‌دست آوردن منحنی حد شکل‌دهی، مسیرهای بارگذاری کرنشی مختلفی برای ورق ایجاد می‌شود تا کرنش‌های بحرانی تحت حالت‌های مختلف تغییرشکل به‌دست

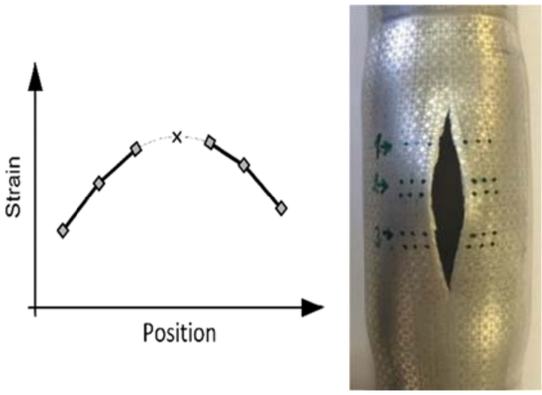
آید و از اتصال آنها به‌هم منحنی حد شکل‌دهی در فضای کرنش‌های اصلی ایجاد گردد. به‌منظور به‌دست آوردن منحنی حد شکل‌دهی در این پژوهش، از نتایج آزمون بالج آزاد لوله که مشخصات آن در جدول (۲) آمده است، استفاده شد. در این آزمایش‌ها، برای ایجاد حالت‌های کرنشی مختلف، میزان تغذیهٔ محوری متفاوتی اعمال شد. در این آزمایش‌ها، اندازه‌گیری کرنش بااستفاده‌از روش تحلیل گرید دایره‌ای انجام گرفت که اولین بار توسط کلر و گودمن [17,18] ارائه شد. در این روش ابتدا برروی سطح ورق دایره‌هایی با قطر مشخص (d) ایجاد می‌گردد و پس از آن فرایند شکل‌دهی انجام می‌گیرد. پس از پایان فرایند، به‌علت تغییرشکل پلاستیک، گرید دایره‌ای به بیضی تغییرشکل می‌یابند. حال با اندازه‌گیری قطر بزرگ (a) و قطر کوچک بیضی (b) و استفاده از رابطهٔ (۲) می‌توان کرنش پلاستیک متناظر با هر گرید را محاسبه کرد.

$$\varepsilon_{major} = ln\left(\frac{a}{d}\right) \quad (۱)$$

$$\varepsilon_{minor} = ln\left(\frac{b}{d}\right) \quad (۲)$$

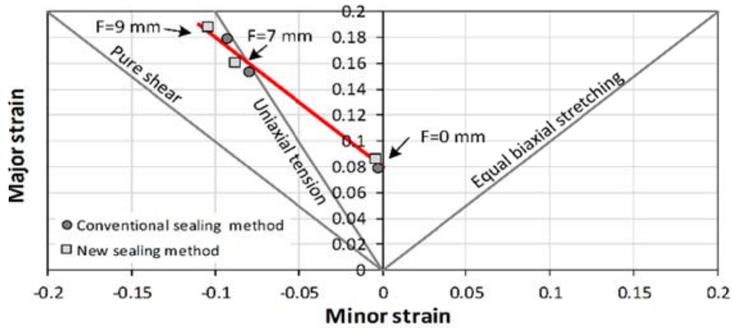
در این پژوهش برای ایجاد گریدهای دایره‌ای با قطر 2.5 میلی‌متر برروی سطح خارجی لوله از روش حک الکتروشیمیایی استفاده شد. همچنین پس از انجام فرایند، خط‌کش انعطاف‌پذیر مایلر برای اندازه‌گیری قطر گریدهای تغییرشکل یافته به‌کار رفت.

برای اندازه‌گیری جفت کرنش صفحه‌ای در لحظهٔ آغاز گلویی‌شدن در این پروژه از روش راسورد [19] استفاده شد. در این روش مطابق با شکل (۱۰) مسیری عمود بر ترک درنظر گرفته می‌شود به‌نحوی‌که در هر طرف ترک سه گرید قرار بگیرد. سپس اندازه‌گیری کرنش برروی این گریدها در دو طرف ترک انجام می‌شود. درادامه باتوجه‌به کرنش‌های به‌دست آمده، برای هر یک از کرنش‌های اصلی بزرگ‌تر و کوچک‌تر درون‌یابی انجام می‌شود و جفت کرنش صفحه‌ای ایجادشده در لحظه گلویی‌شدن به‌دست می‌آید. برای هر ترک حداقل سه مسیر به این شکل درنظر گرفته می‌شود و اندازه‌گیری انجام می‌گردد. میانگین کرنش‌های بحرانی به‌دست آمده برای این مسیرها برای منحنی حد شکل‌دهی استفاده می‌شود.



شکل ۱۰ روند تعیین کرنش‌های صفحه‌ای در آغاز گلویی‌شدن

شکل (۱۱) منحنی حد شکل‌دهی به‌دست‌آمده را برای لوله‌ای از جنس AA6063 با قطر خارجی 40 میلی‌متر و ضخامت 1.5 میلی‌متر نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که به‌علت بالج شدن لوله، کرنش در راستای محیطی همواره کششی و مقداری مثبت دارد درحالی‌که کرنش در راستای طولی لوله، از مقداری نزدیک به صفر (عدم اعمال تغذیهٔ محوری) تا مقداری منفی (اعمال تغذیهٔ محوری) تغییر می‌کند. بنابراین کرنش محیطی همواره کرنش اصلی بزرگ‌تر و کرنش طولی، کرنش اصلی کوچکتر می‌باشد. باتوجه‌به فشاری بودن کرنش‌های طولی، نقاط بحرانی گلویی‌شدن همواره در سمت چپ فضای کرنش‌های اصلی ظاهر می‌شوند که بااستفاده‌از این نقاط می‌توان منحنی حد شکل‌دهی را برای فرایند هیدروفرمینگ لوله به‌دست آورد.



شکل ۱۱ منحنی حد شکل‌دهی برای لولهٔ آلومنیومی از جنس AA6063 با ضخامت 1.5 میلی‌متر

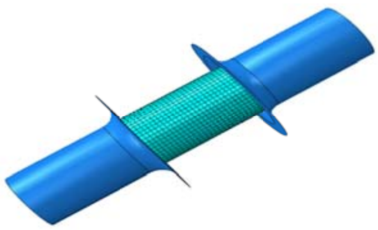
مدل‌سازی اجزای محدود

شبیه‌سازی عددی بالج آزاد لوله در نرم‌افزار تجاری اجزای محدود آباکوس 6/10/1 انجام گرفت. در این شبیه‌سازی‌ها از حلگر دینامیکی صریح استفاده شد.

لوله به‌صورت الاستیک-پلاستیک مدل شد و معادلات ساختاری وابسته به معیار تسلیم ون‌میز به‌کار گرفته شد. برای تعریف رفتار الاستیک ماده، مدول الاستیک و مدول یانگ و برای تعریف رفتار پلاستیک آن منحنی تنش برحسب کرنش پلاستیک در نرم‌افزار وارد شد. همچنین رفتار سخت‌شوندگی ماده به‌صورت همسانگرد درنظر گرفته شد. برای پیش‌بینی گلویی‌شدن در شبیه‌سازی‌های اجزای محدود، از معیار FLDCRT استفاده شد. این معیار گلویی‌شدن را برمبنای منحنی حد شکل‌دهی پیش‌بینی می‌کند. بنابراین منحنی حد شکل‌دهی به‌دست آمده از آزمایش‌های تجربی در نرم‌افزار وارد شد.

باتوجه‌به تغییرشکل ناچیز قالب‌ها، آنها به‌صورت صلب تحلیلی مدل شدند. برای لوله از المان پوسته (المان S4R در آباکوس) استفاده شد. این المان دارای چهار گره می‌باشد و از روش انتگرال‌گیری کاهش‌یافته استفاده می‌کند. انتگرال‌گیری درجهت ضخامت به‌کمک روش سیمپسون و با پنج نقطه انتگرال‌گیری انجام شد. برای مدل‌سازی شرایط تماسی با اصطکاک، از روش پنالتی استفاده شد. قانون اصطکاک کولمب به‌کار گرفته شد و ضریب اصطکاک در شبیه‌سازی‌های مشابه آزمایش‌های تجربی 0.2 تعریف شد. پس از بررسی حساسیت نتایج به‌اندازهٔ المان، ابعاد $2.5mm \times 2.5mm$ برای المان‌ها انتخاب شد که در این حالت لوله از 4032 المان تشکیل شده بود. شکل (۱۲) نمایی از مدل ایجادشده را در نرم‌افزار آباکوس نشان می‌دهد.

در این مقاله دو دسته شبیه‌سازی انجام شد. دستهٔ اول، شبیه‌سازی‌هایی هستند که دقیقاً مطابق با آزمایش‌های تجربی انجام شده‌اند و هدف از آنها، بررسی اعتبار نتایج شبیه‌سازی‌ها می‌باشد. دستهٔ دوم، شبیه‌سازی‌هایی هستند که با هدف ارزیابی عملکرد روش آب‌بندی جدید درمقایسه‌با روش آب‌بندی متداول تحت شرایط فرایندی مختلف انجام شده‌اند. مشخصات شبیه‌سازی‌های دستهٔ دوم در جدول (۳) آمده است. در این شبیه‌سازی‌ها مقدار تغذیهٔ لوله، ضریب اصطکاک و تغذیهٔ محوری متغیر هستند و هر یک در سه سطح درنظر گرفته شده‌اند. منحی بارگذاری (تغییرات تغذیهٔ محوری نسبت به فشار داخلی) به‌صورت خطی است.



شکل ۱۲ مدل اجزای محدود آزمون بالج آزاد لوله

جدول ۳ مشخصات شبیه‌سازی‌های اجزای محدود

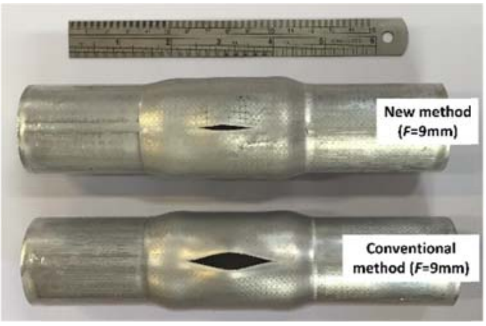
پارامتر		مقدار			
قطر خارجی لوله	$D_{out}\ (mm)$	40			
ضخامت لوله	$t\ (mm)$	1.5			
طول لوله	$L\ (mm)$	250	200	150	
طول بالج	$L_b (mm)$	60			
ضریب اصطکاک	μ	0.4	0.2	0	
تغذیهٔ محوری	$F\ (mm)$	12	9	6	0

نتایج و بحث

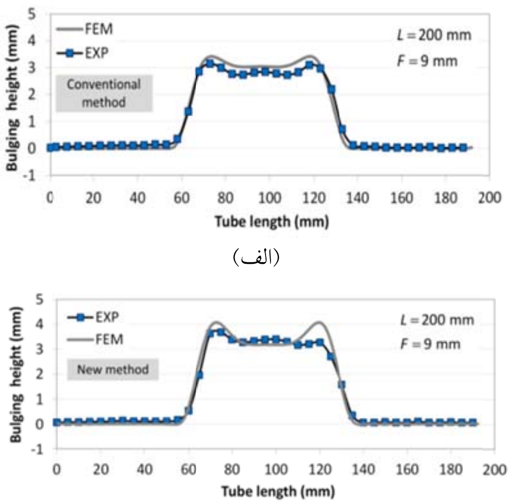
صحت‌سنجی مدل اجزای محدود. به‌منظور صحت‌سنجی مدل اجزای محدود، از آزمایش‌های تجربی با مقدار تغذیهٔ محوری 9 میلی‌متر استفاده شد که شکل (۱۳) نمایی از لوله‌های بالج‌شده در این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

پس از انجام آزمایش‌های تجربی، قطر لولهٔ بالج‌شده اندازه‌گیری شد و با دانستن قطر اولیهٔ آن، میزان افزایش شعاع لوله یا به‌عبارت دیگر ارتفاع بالج لوله محاسبه گردید. مقایسه بین ارتفاع بالج به‌دست آمده از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های اجزای محدود برای روش آب‌بندی متداول و جدید به‌ترتیب در شکل (١٤- الف و ب) آمده است. به‌طور کلی انطباق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی مشاهده می‌شود. بیشترین تفاوت بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی برای گوشهٔ سمت راست ناحیهٔ تغییرشکل در روش آب‌بندی جدید است. نتایج مشخص می‌کنند که بااستفاده‌از روش آب‌بندی جدید ارتفاع بالج در ناحیهٔ تغییرشکل چه در شبیه‌سازی اجزای محدود و چه در آزمایش‌های تجربی افزایش یافته است.

شکل (١٥- الف و ب) به‌ترتیب مقایسه بین ضخامت به‌دست آمده از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های اجزای محدود را برای روش آب‌بندی متداول و جدید نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد انطباق بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی مطلوب است و بیشترین تفاوت مانند ارتفاع بالج در گوشهٔ سمت راست ناحیهٔ تغییرشکل در روش آب‌بندی جدید ایجاد شده است. این تفاوت احتمالاً ناشی از شرایط نامتقارن در دو طرف لوله می‌باشد که در اثر لقی‌های موجود در دستگاه هیدروفرمینگ لوله ایجاد شده است. در روش آب‌بندی جدید برخلاف روش آب‌بندی متداول، ضخامت در ناحیهٔ تغذیه افزایش بسیار کمی یافته است. افزایش ضخامت در ناحیهٔ تغذیه ناشی از مقاومتی است که در برابر جریان فلز در سطح تماس بین لوله و قالب‌ها در اثر نیروی اصطکاک ایجاد می‌شود. این مقاومت در برابر جریان مواد در روش آب‌بندی متداول، دلیل ارتفاع بالج کوچک‌تر به‌دست آمده در این روش درمقایسه‌با روش آب‌بندی جدید نیز می‌باشد.



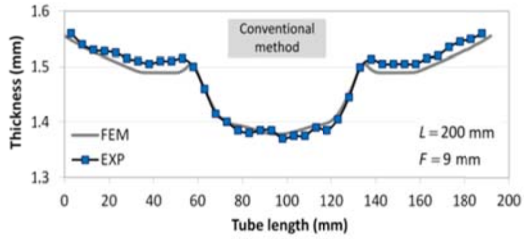
شکل ۱۳ لوله‌های بالج‌شده در آزمون بالج آزاد با روش آب‌بندی متداول و روش آب‌بندی جدید



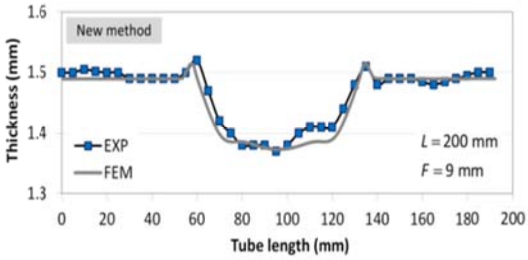
(الف)

(ب)

شکل ١٤ مقایسهٔ ارتفاع بالج پیش‌بینی‌شده در شبیه‌سازی اجزای محدود و اندازه‌گیری‌شده در آزمایش‌های تجربی: (الف) روش آب‌بندی متداول، (ب) روش آب‌بندی جدید



(الف)



(ب)

شکل ۱۵ مقایسهٔ ضخامت پیش‌بینی‌شده در شبیه‌سازی اجزای محدود و اندازه‌گیری‌شده در آزمایش‌های تجربی: (الف) روش آب‌بندی متداول، (ب) روش آب‌بندی جدید

اثر روش آب‌بندی بر ارتفاع بالج در آزمایش‌های تجربی. در آزمایش‌های تجربی مقدار ارتفاع بالج در وسط لوله در صفحه‌ای عمود بر صفحهٔ عبورکننده از محل پارگی اندازه‌گیری شد. نتایج به‌دست آمده از این اندازه‌گیری‌ها در جدول (٤) آمده است.

جدول ٤ مقایسه بین ارتفاع بالج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تجربی بااستفاده‌از روش آب‌بندی متداول و روش آب‌بندی جدید

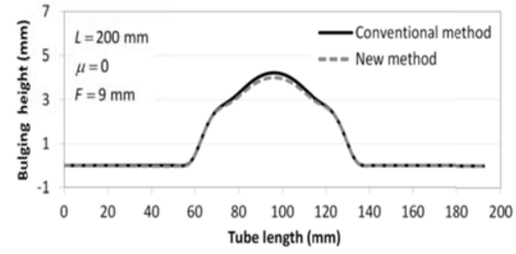
مقدار تغذیه F (mm)	ارتفاع بالج در وسط لوله (mm)		افزایش ارتفاع بالج (٪)
	آب‌بندی متداول	آب‌بندی جدید	
0	1.11	1.12	0.9
7	2.1	2.32	10.48
9	2.85	3.39	18.95

نتایج نشان می‌دهد هنگامی که تغذیهٔ محوری اعمال نمی‌شود افزایش ارتفاع بالج لوله در روش آب‌بندی جدید درمقایسه‌با روش آب‌بندی متداول بسیار کوچک است اما با اعمال تغذیهٔ محوری مقدار آن افزایش می‌یابد. زیرا هنگامی که تغذیهٔ محوری اعمال نمی‌گردد، جریان مواد از ناحیهٔ تغذیه به‌سمت ناحیهٔ تغییرشکل ناچیز است. بنابراین نیروی اصطکاک به‌عنوان نیروی مخالف در برابر جریان طولی مواد بر میزان بالج لوله اثر نمی‌گذارد. این در حالی است که با اعمال تغذیهٔ محوری و افزایش جریان مواد، اثر نیروی اصطکاک بر میزان بالج لوله افزایش می‌یابد. این نتایج را همچنین می‌توان بااستفاده‌از شکل (۹) که در آن کرنش‌های گلویی‌شدن برای هر آزمایش مشخص شده است، توجیه کرد. مطابق شکل (۹)، هنگامی که تغذیهٔ محوری اعمال نمی‌شود به‌علت ناچیز بودن جریان طولی، گلویی‌شدن در دو روش آب‌بندی در کرنش‌های تقریباً برابر و نزدیک به حالت کرنش صفحه‌ای $(\varepsilon_1 = -\varepsilon_3\ , \varepsilon_2 = 0)$ روی می‌دهد در حالی که با اعمال تغذیهٔ محوری و افزایش مقدار آن، به‌علت برقراری جریان طولی مواد، حالت تغییرشکل از کرنش صفحه‌ای به‌سمت حالت کشش تک‌محوری $(\varepsilon_1 = -2\varepsilon_2 = -2\varepsilon_3)$ پیش می‌رود که منجر به افزایش مقدار جفت کرنش بحرانی در هر دو روش آب‌بندی می‌شود. به‌همین دلیل ارتفاع بالج با افزایش تغذیهٔ محوری در هر دو روش افزایش می‌یابد.

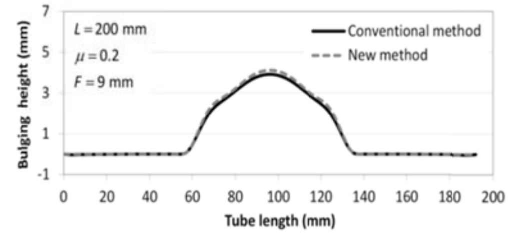
ازآنجایی‌که به‌ازای یک میزان تغذیهٔ محوری مشخص، در روش آب‌بندی جدید جریان طولی مواد بیشتری درمقایسه‌با روش آب‌بندی متداول ایجاد می‌شود، گلویی‌شدن در روش آب‌بندی جدید در کرنش‌های بحرانی بالاتری روی می‌دهد و به‌همین علت ارتفاع بالج بزرگ‌تری در این روش آب‌بندی درمقایسه‌با روش آب‌بندی متداول شکل می‌گیرد.

اثر ضریب اصطکاک بر عملکرد روش آب‌بندی جدید درمقایسه‌با روش آب‌بندی متداول. شکل (١٦) توزیع ارتفاع بالج در راستای طولی لوله را در لحظهٔ گلویی‌شدن به‌ازای ضرایب اصطکاک مختلف نشان می‌دهد. مطابق شکل (١٦)، با افزایش ضریب اصطکاک در روش آب‌بندی متداول، ارتفاع بالج کاهش می‌یابد درحالی‌که در روش آب‌بندی جدید، ارتفاع بالج ثابت باقی می‌ماند. این روند به‌نحوی است که در

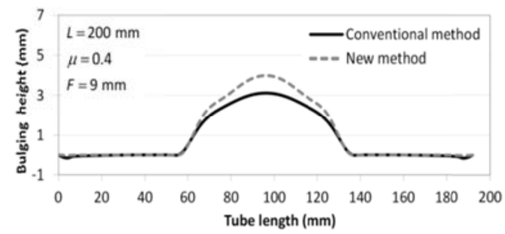
ضریب اصطکاک 0.4 ارتفاع بالج وسط لوله در روش آب‌بندی جدید به میزان 28.13% بیشتر از روش آب‌بندی متداول است. لازم به ذکر است که زمانی که ضریب اصطکاک برابر با صفر است، ارتفاع بالج وسط لوله در روش آب‌بندی جدید به میزان 5.13% کوچک‌تر از روش آب‌بندی متداول است.



(الف)



(ب)

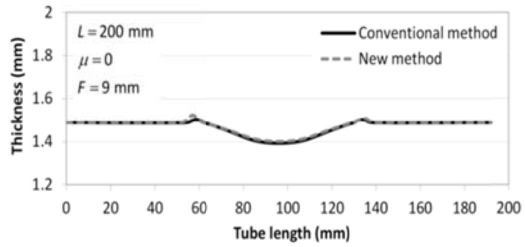


(پ)

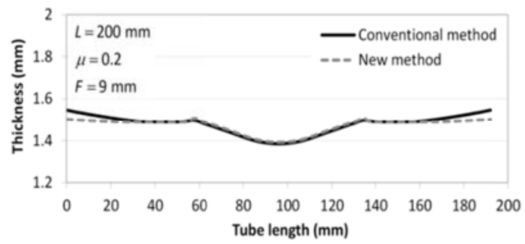
شکل ۱٦ مقایسه بین ارتقاع بالج پیش‌بینی شده در شبیه‌سازی اجزای محدود برای روش آب‌بندی متداول و روش آب‌بندی جدید (الف) $\mu = 0$ (ب) $\mu = 0.2$ (پ) $\mu = 0.4$

شکل (۱۷) توزیع ضخامت در راستای طولی لوله را در لحظهٔ گلویی‌شدن به‌ازای ضرایب اصطکاک مختلف نشان می‌دهد. در روش آب‌بندی متداول با افزایش ضریب اصطکاک، به‌علت افزایش نیروی اصطکاک در سطح تماس لوله با قالب، جریان مواد از ناحیهٔ تغذیه به ناحیهٔ تغییرشکل دشوارتر می‌شود به‌طوری که تغذیهٔ محوری سبب افزایش ضخامت در ناحیهٔ تغذیه، به‌ویژه در دو انتهای لوله، می‌گردد. به‌همین دلیل، همان‌طور که در شکل (١٦) نشان داده شد، در این روش آب‌بندی با افزایش ضریب اصطکاک ارتفاع بالج کاهش می‌یابد.

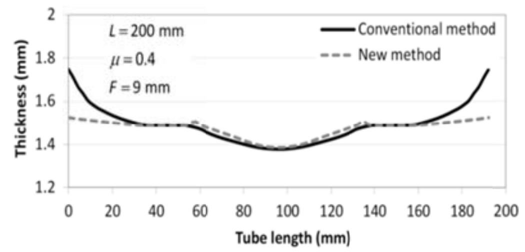
در روش آب‌بندی جدید، به‌علت حذف فشار داخلی در ناحیهٔ تغذیه، نیروی اصطکاک در سطح تماس لوله و قالب حذف می‌گردد، بنابراین جریان طولی مواد تحت تأثیر اصطکاک قرار نمی‌گیرد و ضخامت در ناحیهٔ تغذیه تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. بر همین دلیل در روش آب‌بندی جدید ارتفاع بالج با افزایش ضریب اصطکاک ثابت باقی می‌ماند و با توجه به کاهش ارتفاع بالج در روش آب‌بندی متداول، اختلاف ارتفاع بالج بین دو روش افزایش می‌یابد.



(الف)



(ب)



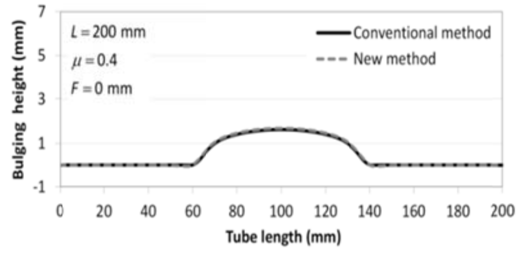
(پ)

شکل ۱۷ مقایسه بین ضخامت پیش‌بینی‌شده در شبیه‌سازی اجزای محدود برای روش آب‌بندی متداول و روش آب‌بندی جدید: (الف) $\mu = 0$، (ب) $\mu = 0.2$، (پ) $\mu = 0.4$

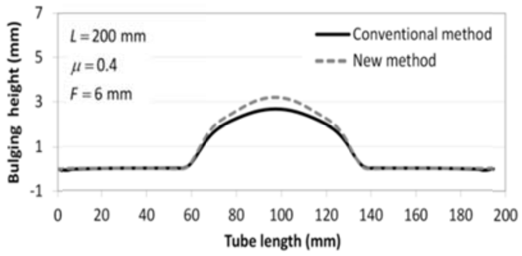
در شرایطی که اصطکاک برابر با صفر است، همان‌گونه که در شکل (۱۷-الف) مشاهده می‌شود، توزیع ضخامت در هر دو روش آب‌بندی تقریباً یکسان است و دیگر افزایش ضخامت در روش آب‌بندی متداول روی نمی‌دهد. تحت این شرایط، میزان تغییرشکل لوله در روش متداول بیشتر از روش جدید است. زیرا در روش آب‌بندی متداول اعمال فشار محیطی در ناحیهٔ تغذیه سبب می‌شود که جریان طولی مواد در راستای طولی لوله درمقایسه‌با روش آب‌بندی جدید تسهیل گردد. به‌همین علت زمانی که ضریب اصطکاک برابر با صقر است، ارتفاع بالج در روش آب‌بندی متداول کمی بیشتر از ارتفاع بالج در روش آب‌بندی جدید است.

اثر تغذیهٔ محوری بر عملکرد روش آب‌بندی جدید درمقایسه‌با روش آب‌بندی متداول. شکل (۱۸) توزیع ارتفاع بالج در راستای طولی لوله را در لحظهٔ گلویی‌شدن به‌ازای تغذیهٔ محوری‌های مختلف نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد هنگامی که تغذیهٔ محوری اعمال نمی‌گردد، ارتفاع بالج در هر دو روش یکسان هستند اما با اعمال تغذیهٔ محوری و افزایش مقدار آن، ارتفاع بالج در هر دو روش آب‌بندی افزایش می‌یابد ولی مقدار افزایش ارتفاع بالج در روش آب‌بندی جدید بیشتر از روش آب‌بندی متداول است. این روند به‌نحوی است که در تغذیهٔ محوری 12 میلی‌متر اختلاف ارتفاع بالج وسط لوله دو روش به 30.24% می‌رسد.

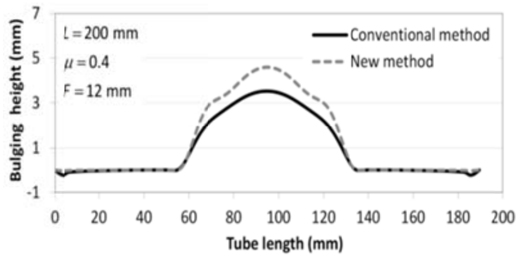
توزیع ضخامت در راستای طولی لوله در لحظه گلویی‌شدن به‌ازای تغذیهٔ محوری‌های مختلف در شکل (۱۹) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد هنگامی که تغذیهٔ محوری اعمال نمی‌گردد، توزیع ضخامت در هر دو روش آب‌بندی یکسان است. زیرا نیرویی از طرف سنبه‌ها اعمال نمی‌شود که منجر به ایجاد جریان طولی مواد در ناحیهٔ تغذیه گردد. بنابراین وجود یا عدم وجود نیروی اصطکاک در سطح تماس لوله و قالب بر جریان مواد بی‌تأثیر است.



(الف)



(ب)

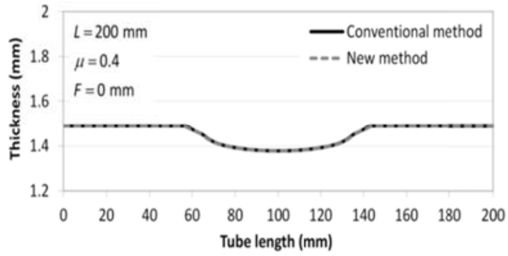


(پ)

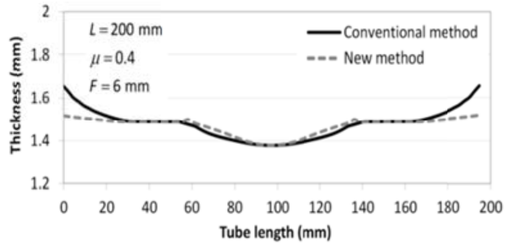
شکل ۱۸ مقایسه بین ارتفاع بالج پیش‌بینی شده در شبیه‌سازی اجزای محدود برای روش آب‌بندی متداول و روش آب‌بندی جدید: (الف) $F = 0\ mm$، (ب) $F = 6\ \text{mm}$، (پ) $F = 12\ \text{mm}$

با اعمال تغذیهٔ محوری و افزایش مقدار آن، در روش آب‌بندی متداول ضخامت ناحیهٔ تغذیه افزایش می‌یابد درحالی‌که در روش آب‌بندی جدید ضخامت ناحیهٔ تغذیه تقریباً ثابت باقی می‌ماند. علت این امر آن است با اعمال تغذیهٔ محوری، در روش آب‌بندی متداول به‌علت مقاومت نیروی اصطکاک در برابر جریان طولی مواد، مواد ناگزیر در راستای ضخامت جریان می‌یابند که منجر به افزایش ضخامت در ناحیهٔ تغذیه روش آب‌بندی متداول می‌گردد. در روش آب‌بندی متداول، هر چه میزان تغذیهٔ محوری بیشتر شود ضخامت در ناحیهٔ تغذیه افزایش بیشتری می‌یابد

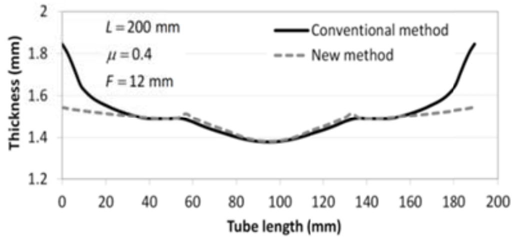
و در نتیجه ارتفاع بالج آن درمقایسه‌با روش آب‌بندی جدید کاهش می‌یابد.



(الف)



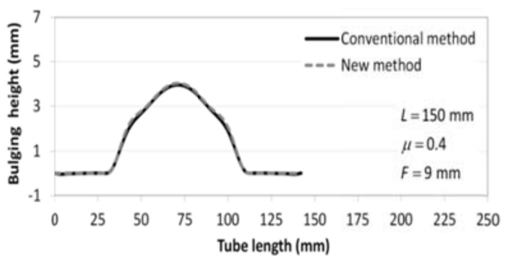
(ب)



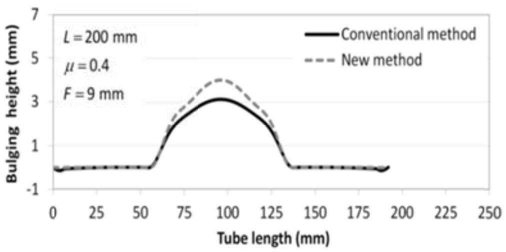
(پ)

شکل ۱۹ مقایسه بین ضخامت پیش‌بینی‌شده در شبیه‌سازی اجزای برای روش آب‌بندی متداول و روش آب‌بندی جدید (الف) $F = 0$ mm، (ب) $F = 6$ mm، (پ) $F = 12$ mm

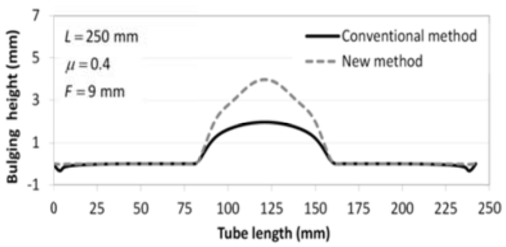
اثر طول لوله بر عملکرد روش آب‌بندی جدید درمقایسه‌با روش آب‌بندی متداول. شکل (۲۰) توزیع ارتفاع بالج در راستای طولی لوله را در لحظهٔ گلویی‌شدن به‌ازای طول‌های مختلف لوله نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی‌ها طول بالج ثابت است. بنابراین با افزایش طول لوله، طول ناحیهٔ تغذیه افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش طول لوله در روش آب‌بندی متداول، ارتفاع بالج کاهش می‌یابد درحالی‌که در روش آب‌بندی جدید، ارتفاع بالج ثابت باقی می‌ماند. ارتفاع بالج در طول لوله 150 میلی‌متر در دو روش آب‌بندی تقریباً برابر است اما در طول لولهٔ 250 میلی‌متر اختلاف ارتفاع بالج وسط لوله به 102.37% می‌رسد.



(الف)



(ب)

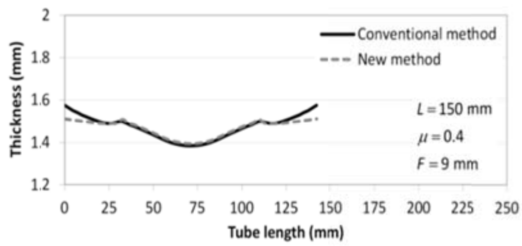


(پ)

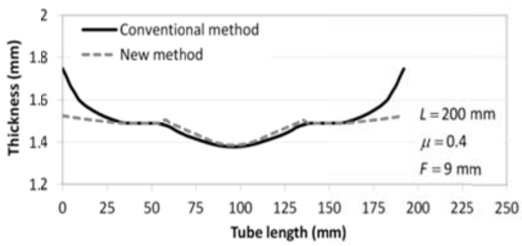
شکل ۲۰ مقایسه بین ارتفاع بالج پیش‌بینی‌شده در شبیه‌سازی اجزای محدود برای روش آب‌بندی متداول و روش آب‌بندی جدید: (الف) $L = 150$ mm، (ب) $L = 200$ mm، (پ) $L = 250$ mm

شکل (۲۱) توزیع ضخامت در راستای طولی لوله را در لحظهٔ گلویی‌شدن به‌ازای طول‌های مختلف لوله نشان می‌دهد. در روش آب‌بندی متداول، با افزایش طول لوله، ضخامت لوله در ناحیهٔ تغذیه و به‌ویژه در دو انتهای لوله افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش طول ناحیهٔ تغذیه، به‌علت افزایش سطح تماس لوله و قالب، نیروی اصطکاک در سطح تماس لوله و قالب افزایش می‌یابد، بنابراین مقاومت در برابر جریان طولی مواد نیز

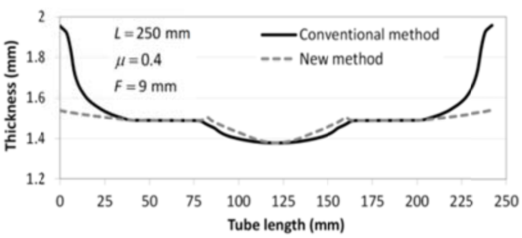
بیشتر می‌شود که نتیجهٔ آن افزایش ضـخامت در ناحیـهٔ تغذیهٔ لوله و کاهش ارتفاع بالج لوله است.



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۲۱ مقایسه بین ضخامت پیش‌بینی‌شده در شبیه‌سازی اجزای محدود برای روش آب‌بندی متداول و روش آب‌بندی جدید، (الف) $L = 150$ mm، (ب) $L = 200$ mm، (پ) $L = 250$ mm

در روش آب‌بنـدی جدیـد، از آنجـایی کـه فشـار داخلی در ناحیهٔ تغذیه اعمال نمی‌گردد، افـزایش طـول ناحیهٔ تغذیه بر نیروی اصطکاک اثر نمی‌گذارد. بنابراین جریان طولی و به‌تبع آن توزیع ضخامت و ارتفاع بـالج تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد.

نتیجه‌گیری

در ایـن مقالـه روش آب‌بنـدی جدیـدی بـرای فراینـد هیدروفرمینگ لوله بـه‌کـار گرفتـه شـد. در ایـن روش، آب‌بندی از ابتدای ناحیهٔ تغییرشکل صورت گرفـت تـا فشار داخلی در ناحیهٔ تغذیه اعمال نشود و بدین ترتیب نیروی اصطکاک در سطح تماس لولـه و قالـب حـذف گـردد. ایـن روش آب‌بنـدی بااسـتفاده‌از افزونـه‌هـای ویژه‌ای که به سنبه‌های متداول فرایند هیدرفرمینگ لوله افزوده می‌شود، پیاده‌سازی شد. نتایج آزمـون بـالج آزاد لولـه نشـان داد هنگـامی کـه تغذیـهٔ محـوری اعمـال می‌گردد، به علت جریان طولی راحت‌تر مواد در روش آب‌بندی جدید، گلویی‌شدن در کرنش‌های بزرگ‌تـری درمقایسه‌بـا روش آب‌بنـدی متـداول روی مـی‌دهـد و به‌همین دلیـل در روش آب‌بنـدی جدیـد ارتفـاع بـالج بزرگ‌تری شکل می‌گیرد. بااستفاده‌از جفت کرنش‌هـای بحرانی اندازه‌گیری‌شده، منحنی حد شکل‌دهی به‌دسـت آمد که از آن برای پیش‌بینی گلویی‌شدن در شبیه‌سـازی اجزای محدود استفاده شد. صحت شبیه‌سـازی اجـزای محدود نیز از طریق مقایسهٔ توزیـع ضـخامت و ارتفـاع بالج با نتایج آزمـایش‌هـای تجربـی تأییـد شـد. نتـایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد بـا افـزایش ضـریب اصـطکاک، تغذیـهٔ محـوری و طـول لولـه، ارتفـاع بـالج در روش آب‌بندی جدیـد درمقایسـه‌بـا روش آب‌بنـدی متـداول افزایش می‌یابد به‌طوری‌که ارتفاع بـالج بـه بـیش از دو برابر ارتفاع بالج روش آب‌بندی متداول می‌رسد. زیرا با افزایش ایـن پـارامترهـا جریـان طـولی مـواد در روش آب‌بندی متداول درمقایسـه‌بـا روش آب‌بنـدی جدیـد، دشوارتر می‌گردد که افزایش ضخامت در ناحیهٔ تغذیـه روش آب‌بنـدی متـداول را نیـز در پـی دارد. بنـابراین باتوجه‌به نتایج به‌دست آمده این روش آب‌بنـدی بـرای فرایند هیدروفرمینگ لوله توصیه می‌گردد.

مراجع

1. Plancak, M., Vollertsen, F. and Woitschig, J., "Analysis, finite element simulation and experimental investigation of friction in tube hydroforming", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 170, pp. 220-228, (2005).
2. Ngaile, G. and Yang, C., "Analytical model for the characterization of the guiding zone tribotest for

tube hydroforming", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 131, pp. 591-600, (2009).

3. Vollertsen, F. and Plancak, M., "On possibilities for the determination of the coefficient of friction in hydroforming of tubes", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 125, pp. 412-420, (2002).
4. Koc, M., "Tribological Issues in the Tube Hydroforming Process—Selection of a Lubricant for Robust Process Conditions for an Automotive Structural Frame Part", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 125, pp. 484-492, (2003).
5. Prier, M. and Schmoeckel, D., "Tribology of internal high pressure forming", MAT-INFO Werksstoff-Informationosgesellschaft mbH, Humburger Allee, Vol. 26, pp. 379-390, (1999).
6. Yi, H.K., Yim, H.S., Lee, G.Y., Lee, S.M., Chung and G.S. and Moon, Y.H., "Experimental investigation of friction coefficient in tube hydroforming", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 21, pp. 194-198, (2011).
7. Fiorentino, A., Ceretti, E. and Giardini, C., "Tube hydroforming compression test for friction estimation—numerical inverse method, application, and analysis", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 64, pp. 695-705, (2013).
8. Yang, L., Wu, C. and He, Y., "Dynamic frictional characteristics for the pulsating hydroforming of tubes", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 86, pp. 347-357, (2015).
9. Abdelkefi, A., Malécot, P., Boudeau, N., Guermazi, N. and Haddar, N., "Evaluation of the friction coefficient in tube hydroforming with the “corner filling test” in a square section die", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 88, pp. 2265-2273, (2017).
10. Orban, H. and Hu, S.J., "Analytical modeling of wall thinning during corner filling in structural tube hydroforming", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 194, pp. 7-14, (2007).
11. Xu, X., Zhang, W., Li, S. and Lin, Z., "Study of tube hydroforming in a trapezoid-sectional die", *Thin-Walled Structures*, Vol. 47, pp. 1397-1403, (2009).
12. Nikhare, C., Weiss, M. and Hodgson, P.D., "FEA comparison of high and low pressure tube hydroforming of TRIP steel", *Computational Materials Science*, Vol. 47, pp. 146-152, (2009).
13. Fiorentino, A., Ceretti, E., Braga, D. and Marzi, R., "Friction in asymmetric feeding tube hydroforming", *International Journal of Material Forming*, Vol. 3, pp. 275-278, (2010).
14. Abdelkefi, A., Guermazi, N., Boudeau, N., Malécot, P. and Haddar, N., "Effect of the lubrication between the tube and the die on the corner filling when hydroforming of different cross-sectional shapes", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 87, pp. 1169-1181, (2016).
15. Fiorentino, A., Ceretti, E., Attanasio, A., Braga, D. and Giardini, C., "Experimental study of lubrication influence in the production of hydroformed T-joint tubes", *Key Engineering Materials*, Vol. 410, pp. 15-24, (2009).
16. Hashemi, S. J., Moslemi Naeini, H., Liaghat, G. H. and Azizi Tafti, R., "Prediction of bulge height in warm hydroforming of aluminum tubes using ductile fracture criteria", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 15(1), pp. 19-29, (2015).
17. Keeler, S.P., "Circular grid system—a valuable aid for evaluating sheet metal formability", *SAE Technical Paper*, (1968).
18. Goodwin, G.M., "Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop", *SAE Technical Paper*, No. 680093, (1968).
19. Kasaei, M.M., Moslemi Naeini, H., Liaghat, G.H., Silva, C.M.A., Silva, M.B. and Martins, P.A.F., "Revisiting the wrinkling limits in flexible roll forming", *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 50, pp. 528-54, (2015).